

0-794649

На правах рукописи



Лупандина Мария Алексеевна

**ОСАЖДЕНИЕ НАНО- И СУБМИКРОННЫХ
ЧАСТИЦ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В МОЩНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Специальность 01.04.06 – «Акустика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических
наук

Таганрог - 2012 г.

Работа выполнена в Технологическом институте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге (ТТИ ЮФУ) на кафедре электроакустической и медицинской техники

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор Чернов Николай Николаевич

Официальные оппоненты:

Панич Анатолий Евгеньевич - доктор технических наук, профессор, декан факультета высоких технологий ЮФУ, г. Ростов-на-Дону

Короченцев Владимир Иванович - доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой приборостроения Дальневосточного Федерального технического университета, г. Владивосток



0000793450

Ведущая организация:

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Южно-Российский государственный технический университет (НПИ), г. Новочеркасск.

Защита состоится «15» 05 2012 г. в 14²⁰ часов в ауд. Е-306 на заседании диссертационного совета Д 212.208.23 при Федеральном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» по адресу: ул. Шевченко, 2, г. Таганрог, Ростовская область.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной библиотеке Южного федерального университета.

Автореферат разослан «21» 03 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.208.23

Старченко Ирина Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Осаждение тонкодисперсных аэрозолей остается важной научно-технической проблемой в разных областях промышленности и в исследовательских проектах (в системах очистки промышленных выбросов, в технологиях защитных покрытий, в экологии, в нанотехнике и др.). В связи с интенсификацией технологических процессов доля тонкодисперсных аэрозолей (в металлургии, в химических производствах и др.) возрастает. Появились технологии нанесения субмикронных и наночастиц для получения новых качеств изделий.

Использование мощных акустических колебаний резко интенсифицирует процессы коагуляции и осаждения аэрозолей. При наложении мощного акустического поля помимо колебательного движения среды и аэрозоля возникает гидродинамическое взаимодействие полей обтекания частиц, изменяются процессы диффузии, ускоряются тепло- и массообмен за счет различных акустических течений в объеме и особенно в пограничных слоях.

Исследования воздействия мощных акустических колебаний на аэродисперсные системы и внедрение этого метода в разных отраслях промышленности широко проводились в 60-х – 90-х годах прошлого столетия. Значительный вклад в исследование акустического воздействия на процессы коагуляции и осаждение промышленных аэрозолей внесли отечественные ученые Е.П.Медников, Ю.Я.Борисов, В.И.Тимошенко, Н.Н.Чернов и др.

Осаждение тонкодисперсных аэрозолей при наложении мощного акустического поля представляет собой сложное физико-химическое явление из-за высокой адгезионной способности и подвижности нано- и субмикронных частиц. Для его понимания, математического моделирования и создания промышленных технологий можно использовать существующие в научно-технической литературе представления. Однако для субмикронных и наночастиц в литературе практически отсутствуют теоретические и экспериментальные результаты по диффузии в свободном пространстве и при наличии пограничных (акустического и гидродинамического) слоев. Для нано- и субмикронных аэрозолей число соударений с молекулами газа с разных сторон неодинаково, т.к. сказывается прерывистость среды. Из-за этого меняется (увеличивается) подвижность частиц из-за изменения стоковской силы, а отсюда растет и коэффициент диффузии. Кроме того,

акустический пограничный слой много меньше по толщине гидродинамического, и диффузия к поверхности при озвучивании потока резко возрастает. Именно эти процессы, которые играют важную роль в осаждении субмикронных и наночастиц в промышленных технологиях при наложении мощного акустического поля, являются целью диссертационного исследования.

Цель работы и задачи исследования. Теоретическое и экспериментальное исследование осаждения нано- и субмикронных аэрозольных частиц в акустическом поле применительно к проблеме выбора параметров оборудования для интенсификации технологических процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе решения уравнений диффузии провести исследование изменения счётной концентрации от источника до осаждаемой поверхности для нано- и субмикронных частиц промышленных аэрозолей, находящихся в акустическом поле, при варьировании основных параметров (размеров частиц, температуры, вязкости и плотности среды, а также звукового давления и частоты).

2. Разработать математическую модель и провести теоретическое исследование изменения диффузионного потока нано- и субмикронных частиц промышленных аэрозолей через гидродинамический и акустический пограничные слои при изменении параметров акустического поля среды и аэрозоля.

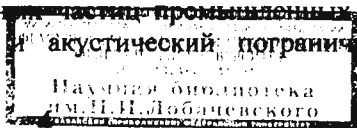
3. Разработать и создать лабораторную установку и провести экспериментальные исследования осаждения различных нано- и субмикронных аэрозолей пограничные слои в потоке со звуком и без него.

4. Исследовать конфигурацию частиц и их агрегатов, а также дисперсное распределение различных осаждаемых нано- и субмикронных аэрозолей при изменении параметров потока и акустического поля методом атомно-силовой микроскопии.

5. Провести сравнение теории с экспериментом и дать рекомендации по выбору параметров для технологических установок с использованием мощного звука.

Новые научные результаты.

1. Предложена математическая модель для расчета диффузионного потока нано- и субмикронных частиц промышленных аэрозолей через гидродинамический и акустический пограничные слои,



которая позволяет связать поток осажденных нано- и субмикронных частиц с параметрами звукового поля, среды и аэрозоля.

2. Результаты экспериментальных исследований диффузионного потока наноразмерных частиц четырех типов аэрозолей через акустический и гидродинамический пограничные слои, показывающие правильность предложенной теоретической модели.
3. Экспериментально с использованием атомно-силового микроскопа исследованы конфигурация различных аэрозолей, а также их дисперсное распределение при варьировании параметров потока и акустического поля.

Практическая значимость.

1. Результаты проведенных исследований необходимы при проектировании перспективных технологий осаждения нано- и субмикронных частиц в различных отраслях промышленности (в химической, металлургической, авиационной, в экологических проектах и др.).

2. Математические модели, разработанные в диссертации, пригодны для широкого класса промышленных и природных аэрозолей.

3. Используемая методика атомно-силовой микроскопии для экспериментального исследования конфигурации частиц и их агрегатов, а также дисперсного состава нано- и субмикронных аэрозолей может быть применена для измерения параметров многочисленных промышленных и природных аэрозолей.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель и результаты расчета диффузионного потока нано- и субмикронных частиц промышленных аэрозолей через акустический и гидродинамический слои, позволяющие рассчитать осаждения тонкодисперсных аэрозолей при варьировании основных параметров звукового поля (частоты и звукового давления), аэрозоля (размеров и удельного веса) и среды (вязкости, температуры, плотности).

2. Результаты экспериментального исследования диффузионного потока наноразмерных частиц четырех сортов сигаретного дыма через акустический и гидродинамический пограничные слои, доказавшие, что в акустическом поле резко

увеличивается осаждение аэрозолей, что соответствует созданной математической модели процесса.

3. Результаты атомно-силовой микроскопии конфигурации осажденных частиц, их агрегатов, а также дисперсного состава различных нано- и субмикронных аэрозолей при воздействии звука и без него, в потоке и без него, которые свидетельствуют об интенсифицирующем действии мощного акустического поля на процесс осаждения различных тонкодисперсных аэрозолей.

Внедрение результатов работы.

Результаты исследования осаждения нано- и субмикронных частиц промышленных аэрозолей в акустическом поле оказались полезны для разработки перспективной технологии защитного покрытия на Таганрогском авиационном научно-техническом комплексе имени Г.М. Бериева (ОАО ТАНТК им. Г.М. Бериева), а также внедрены в учебный процесс Технологического института ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет» в г. Таганроге, что подтверждается документами, приведенными в приложении.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- XVIII сессия Российского Акустического общества – форум «Человек и наука в XXI веке» (ТРТУ, г. Таганрог, 2006г.);
- Всероссийские научно-технические конференции «Экология 2006 – море и человек» (ТРТУ, г. Таганрог, 2006г.);
- XIX сессия Российского Акустического общества (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, 2007г.);
- Всероссийский смотр-конкурс «Эврика-2007» (Юж.-Рос. Государственный технический университет – НПИ, г. Новочеркасск, 2007г.);
- Всероссийская научно-техническая конференция «Медицинские информационные системы» (ТТИ ЮФУ, г. Таганрог, 2008 и 2010гг.);
- VI Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых (СПбГТУ г. Санкт-Петербург, 2009г.);
- V научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН (ТТИ ЮФУ, г. Таганрог, 2009г.);
- Научная конференция студентов и аспирантов по медицинским технологиям (ТТИ ЮФУ, г. Таганрог, 2009г.);
- IV всероссийская олимпиада по нанотехнологиям «Нанотехнологии – прорыв в будущее», секция «Квантовый эффект» и конкурс НТ-МДТ

«Прозондируем наномир» (МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, 2010г.);

- Всероссийская научно-техническая конференция «Экология 2011 – море и человек» (ТТИ ЮФУ, г. Таганрог, 2011 г.).

Публикации. По теме исследований опубликовано 15 печатных работ, в том числе 7 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами и заключениями, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 131 страницах машинописного текста, 46 рисунках и содержит список литературы из 68 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научные результаты выносимые на защиту, выделены научная новизна, практическая значимость и методика исследования, приведены общие характеристики работы и краткое содержание диссертационной работы.

В первом разделе рассматриваются существующие в литературе методы и результаты исследования акустического осаждения промышленных дымов и туманов.

Делается заключение, что большинство положений существующих в литературе теоретических представлений относится к микронным размерам частиц. Нано- и субмикронные аэрозольные частицы имеют иные параметры движения в акустическом поле: резко увеличивается их подвижность, сказывается прерывистость среды, меняется процесс диффузии. При проектировании промышленных технологических установок для осаждения нано- и субмикронных аэрозолей важно знать зависимость процесса диффузии от параметров звукового поля, среды и аэрозолей. В литературных источниках таких сведений нет.

Поэтому применительно к проблеме выбора параметров оборудования для интенсификации технологических процессов необходимо теоретически и экспериментально исследовать осаждение нано- и субмикронных аэрозольных частиц в мощном звуковом поле. Формулируются цель и задачи диссертационной работы.

В разделе 2 решена задача и проанализировано полученное выражение для изменения счетной концентрации n в камере при

направленной диффузии в звуковом поле от источника нано- и субмикронных частиц промышленных аэрозолей.

Математическая модель строится на базе решения операционным методом диффузионного уравнения (второго уравнения Фика) в частных производных с соответствующим заданием начальных и граничных условий:

$$\frac{1}{D} \cdot \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

С использованием функционального преобразования Лапласа уравнение (1) переводится в обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка для трансформанты функции концентрации аэрозоля. Найдено решение этого уравнения. После обратного преобразования интегральное выражение для комплексной переменной с помощью теории вычетов приобрело вид формулы изменения счетной концентрации при направленной диффузии от источника аэрозоля в функции от времени, расстояниях и коэффициента диффузии:

$$n(x, t) = n_0 \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{\cos \left[(2N+1) \frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{x}{d} \right) \right] \exp \left[-(2N+1)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \cdot \frac{D}{d^2} t \right]}{(2N+1)} \right\}, \quad (2)$$

где n_0 – начальная концентрация аэрозоля.

Для тонкодисперсных аэрозольных частиц, находящихся в акустическом поле, используется полученное в работах Тимошенко В.И. выражение для коэффициента диффузии с учетом параметров поля, аэрозоля и среды:

$$D = \frac{kT(1+\alpha)}{6\pi\eta R} \left(1 + \frac{3}{16} \text{Re} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; η – сдвиговая вязкость; R – радиус частиц; Re – число Рейнольдса; $(1+\alpha)$ – поправка Милликена, учитывающая изменение подвижности мельчайших частиц из-за влияния прерывистости среды:

$$1 + \alpha = 1 + A_M \left(\frac{l}{R} \right) + Q_M \left(\frac{l}{R} \right) \exp \left(-\frac{b_M R}{l} \right),$$

где A_m , Q_m , b_m – константы, равные $A_m=1,246$; $Q_m=0,42$; $b_m=0,87$; l – длина свободного пробега молекул среды.

С использованием выражения (2) проведен анализ относительного изменения счетной концентрации n/n_0 нано- и субмикронных частиц промышленных аэрозолей с учетом экспериментальных данных в функции от параметров аэрозоля, среды и звукового поля. Счетная концентрация наноразмерных частиц в звуковом поле практически не зависит от частоты f и спадает в камере по мере удаления от источника аэрозоля. Отсюда следует вывод, что выбор частоты и типа источника звука для технологических установок должен определяться технико-экономическими показателями излучателя. Влияние частоты будет сказываться для относительно крупных аэрозолей при значительных амплитудах звукового давления, когда для частиц числа Рейнольдса больше единицы. В камерах меньшего размера относительные изменения счетной концентрации n/n_0 по абсолютной величине больше по сравнению с большими камерами, оставаясь постоянными при относительных значениях x/d . По мере удаления от источника аэрозоля концентрация спадает. Это спадание можно связать с известным параметром диффузионного пограничного слоя.

При выборе и обосновании параметров технологических установок для осаждения нано- и субмикронных частиц предложенная математическая модель направленной диффузии частиц от источника дыма позволяет оценить влияние основных параметров аэрозоля, среды и акустического поля.

В разделе 3 представлены результаты теоретического и экспериментального исследования диффузионного потока Π (число частиц через единицу площади в единицу времени, $1/m^2 \cdot c$) субмикронных и наночастиц через акустический и гидродинамический пограничные слои.

Формулируется задача математического моделирования (на базе первого уравнения Фика) диффузионного потока Π_x , Π_y наночастиц через пограничные слои (см. рис. 1) применительно к технологическим аппаратам для осаждения тонкодисперсных аэрозолей. Осаждение аэрозолей таким же образом происходит на поверхности (лопатки турбин, корпуса) летательных и быстро движущихся аппаратов через гидродинамический

$\delta_z = \sqrt{l^2 / Re} = \sqrt{\nu l / V_0}$ или акустический $\delta_a = \sqrt{2\nu / \omega}$ пограничные

слои, где $\nu = \eta / \rho$ – кинематическая вязкость среды, ρ – ее плотность, v_0 – начальная скорость потока, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота звука, l – характерный размер течения.

Решается уравнение непрерывности для стационарного ($\partial \Pi / \partial t = 0$) потока в виде:

$$\partial \Pi_x / \partial x + \partial \Pi_y / \partial y = 0, \quad (4)$$

где диффузионный поток $\Pi_y(x)$ через соответствующий пограничный слой на стенку равен

$$\Pi_y(x) = -D \partial n(x, y) / \partial y. \quad (5)$$

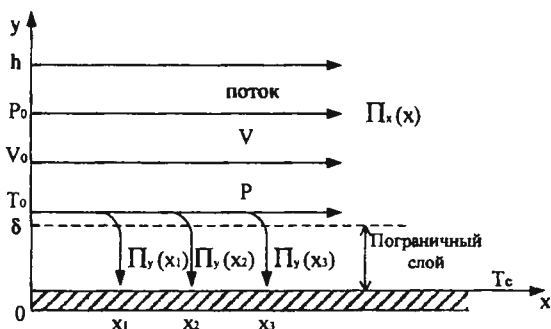


Рисунок 1 - Ответвление диффузионного потока через пограничный слой

Коэффициент диффузии аэрозольных частиц D меняется от температуры среды T вследствие изменения средней скорости движения молекул газа, соударяющихся с аэрозольной частицей и обеспечивающих их подвижность. Распределение температуры в потоке аэрозоля в канале шириной h и перепада по толщине пограничного (акустического или гидродинамического) слоя δ можно аппроксимировать функцией:

$$T = T_c - (T - T_n) \frac{(h - y)}{\delta}, \quad (6)$$

где T_c – температура стенки, T_n – температура в потоке.

Из рисунка 1 видно, что скорость v потока аэрозоля зависит от ширины канала h и толщины пограничного слоя δ . Скорость v потока должна возрасть при увеличении толщины пограничного слоя (гидродинамического δ_r или акустического δ_a). В это изменение

должна вмешиваться и температура. Найдено указанное изменение скорости:

$$\nu = \nu_0 \frac{T_c}{T_0} \cdot \frac{h}{(h - \delta)}. \quad (7)$$

Из (4) и (5) с учетом (6) и (7) в диссертации получены расчетные формулы для оценки относительного изменения осаждаемых диффузионных потоков нано- и субмикронных аэрозолей через пограничные слои, соответственно, в акустическом поле:

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(\rho\omega)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{\nu_0(2\eta)^{\frac{1}{2}}6\pi\eta R(1+\frac{3}{16}\text{Re})} \exp\left[-\frac{(\rho\omega)^{\frac{1}{2}}k(1+\alpha)T\beta}{\nu_0 h(2\eta)^{\frac{1}{2}}(1+\frac{3}{16}\text{Re})6\pi\eta R} x\right] \quad (8)$$

и в гидродинамическом потоке:

$$\frac{\Pi_y(x)}{\Pi_0} = \frac{kT(\rho)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(\nu_0)^{\frac{1}{2}}(\eta\ell)^{\frac{1}{2}}6\pi\eta R} \exp\left[-\frac{kT(\rho)^{\frac{1}{2}}(1+\alpha)\beta}{(\nu_0)^{\frac{1}{2}}(\eta\ell)^{\frac{1}{2}}h6\pi\eta R} x\right]. \quad (9)$$

При проектировании технологических аппаратов, использующих осаждение тонкодисперсных промышленных аэрозолей (при нанесении защитных покрытий; осаждение субмикронных частиц технического углерода-, оксидов железа и др. в электрофильтрах, создание новых материалов с покрытиями из наночастиц и др.), надо знать зависимость потока высокоадгезионного аэрозоля через гидродинамический и акустический пограничные слои от основных параметров среды, аэрозоля и акустического поля. Математическая модель, заложенная в формулах (8) и (9), позволяет это сделать.

Для наглядной связи реальной действительности и расчетных параметров осаждаемого диффузионного потока на рис. 2 представлено экспериментально полученное с одного из сканов с помощью атомно-силовой микроскопии трехмерное изображение аэрозольных наночастиц сигаретного дыма «Malboro». Как видно, частицы имеют разные размеры. У наиболее многочисленных мелких частиц они составляют 20÷60 нм.

В инновационных технологических установках с использованием нано- и субмикронных частиц размеры каналов, где движется осаждаемый аэрозоль небольшие. Оценим влияние расстояния x в расчетной модели по формуле (8) на осаждение

диффузионного потока через акустический пограничный слой. На рисунке 3а,б представлены серии графиков частотной зависимости изменения осаждаемого диффузионного потока через акустический пограничный слой при дискретных расстояниях $x_1=0,15$ м; $x_2=0,35$ м; $x_3=0,55$ м и $x_4=0,65$ м для размеров частиц $R=50$ нм (соответственно кривые 1, 2, 3 и 4) и $R=300$ нм (кривые 5, 6, 7 и 8) для рис. 3а, и $R=100$ нм (кривые 1,2,3 и 4), $R=600$ нм (кривые 5,6,7 и 8) и $R=900$ нм (кривые 9,10,11 и 12) для рис. 3б.

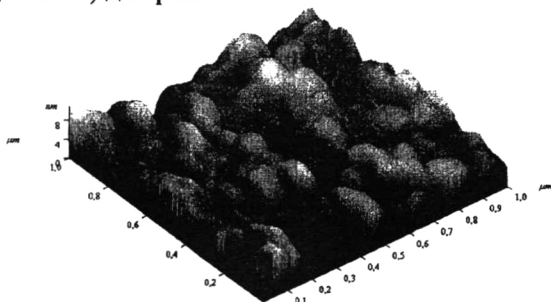
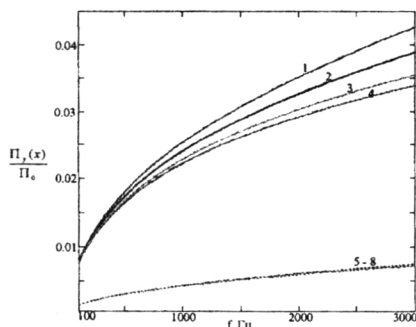
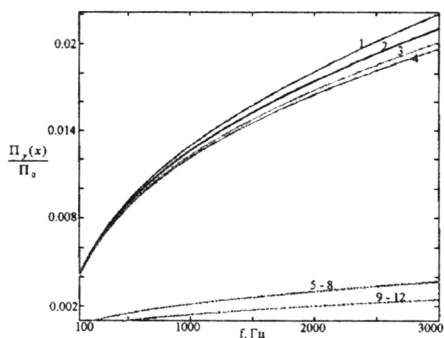


Рисунок 2 – Трехмерная микрофотография наночастиц сигаретного дыма «Malboro» (частота звука 930 Гц, уровень звукового давления 140 дБ)



а



б

Рисунок 3 – Изменение от частоты диффузионного потока через акустический пограничный слой для различных расстояний x по каналу: а - кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют $x_1=0,15$ м; $x_2=0,35$ м; $x_3=0,55$ м и $x_4=0,65$ м при $R=50$ нм; кривые 5, 6, 7 и 8 при $R=300$ нм, x_1, x_2, x_3 и x_4 – те же; б - для кривых 1,2,3 и 4, соответственно, $x_1=0,15$ м; $x_2=0,35$ м; $x_3=0,55$ м и $x_4=0,65$ м при $R=100$ нм; для кривых 5,6,7 и 8 x_1 ;

x_2 ; x_3 и x_4 - те же при $R=600$ нм; для кривых 9,10,11 и 12 x_1 ; x_2 ; x_3 и x_4 - те же при $R=900$ нм

Как видно из графиков, с увеличением расстояния x высокочастотная область графиков заметно изменяется. Диффузионный поток через акустический пограничный слой с расстоянием уменьшается, демонстрируя законы сохранения массы (из-за обеднения основного потока). В пределах одного метра падение потока составляет 1,2 раза.

Сравнение графиков рис. 3а и рис.3б показывает, что для более крупных частиц диффузионный поток через акустический пограничный слой спадает сильнее по сравнению с мелкими, но и влияние экспоненциального члена с увеличением расстояния также падает. При увеличении размера частиц в 3 раза (рис. 3а) спадание на некоторых частотах диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический пограничный слой достигает 5-7 раз. Сравнение диффузионных потоков через акустический пограничный слой между нано- и субмикронными частицами предсказывает заметное увеличение осаждения именно наночастиц (особенно на повышенных частотах). Осаждение в акустическом поле потока наночастиц при некоторых сочетаниях остальных параметров в 5 – 8 раз превышает соответствующие значения для субмикронных частиц.

Не следует забывать, что в рассчитываемый по математической модели поток осаждаемого аэрозоля за счет диффузии в акустическом поле входит (по определению) число частиц. В свою очередь, число аэрозольных частиц зависит обратно пропорционально кубу размеров. Этот фактор важен при оценке вариантов проектируемых технологических устройств.

Проба аэрозоля сигарет марки «Malbogo» для рис.2 была взята при диффузионном осаждении на ситаловую подложку в экспериментальной установке при расстоянии $x_f=0,15$ м при комнатной температуре $T=20^\circ\text{C}$ и скорости протяжки аэрозоля $v_0=1$ м/с. Звуковое давление было установлено на уровне $p_{зв}=140$ дБ (или $p_{зв}=200$ Па, амплитуда колебательной скорости $U_0=0.5$ м/с) на частоте $f=930$ Гц. Проведены также эксперименты на частоте 450 кГц. Обработка большого числа сканов соответствующей подложки, полученных с помощью атомно-силового микроскопа, позволило получить величину осажденного диффузионного потока наноразмерных частиц через акустический пограничный слой, равную

$\Pi_y(x_1)=9 \cdot 10^{11} \text{ 1/м}^2\text{с}$. Таким же образом при тех же параметрах ($f, p_{\text{эв}}, T, v_0$) получены значения осажденного диффузионного указанных нано- и субмикронных частиц в точках $x_2 = 0,35 \text{ м}$, $x_3 = 0,55 \text{ м}$ и $x_4 = 0,65 \text{ м}$. Результаты эксперимента, отмеченные крестиками на рис. 4, показывают процесс изменения от расстояния x осажденного через акустический пограничный слой диффузионного потока тонкодисперсных частиц табачного дыма сигарет марки «Malboro».

Как видно из рис. 4, в звуковом поле наблюдается спад с увеличением расстояния x диффузионного потока тонкодисперсного аэрозоля, осажденного через акустический пограничный слой. Толщина δ_a акустического пограничного слоя в условиях данного

эксперимента меньше миллиметра ($\delta_a = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$). Функция

спада $\Pi_y(x)$ в эксперименте близка к экспоненте, что соответствует математической модели по выражению (8), описывающему процесс осаждаемого диффузионного потока тонкодисперсных аэрозольных частиц через акустический пограничный слой. Точки взятия проб на ситаловые подложки примерно соответствуют расчетной схеме рис. 1. Полученные зависимости коррелируют с расчетными графиками 1, 2, 3 на рис. 3а и рис.3б (соответственно на частоте звука в эксперименте 930 Гц), построенных при параметрах, близких к эксперименту. На наноперефотографиях (см. рис. 2) частиц табачного дыма сигарет марки «Malboro» видны аэрозольные частицы размером от 20 до 200 нм.

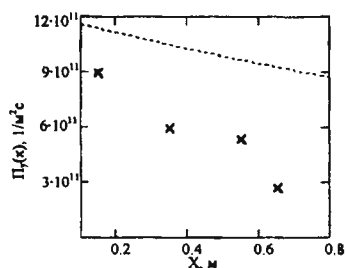


Рисунок 4 – Изменение осажденного диффузионного потока через акустический пограничный слой частиц дыма сигарет «Malboro» от расстояния x (крестики – эксперимент, пунктирная линия - теория)

Сравнение результатов расчета по формулам (8) и (9) соответствующих экспериментов (со звуком и без) показывают, что диффузионный поток осаждаемых нано- и субмикронных частиц в акустическом поле в 3-7 раз больше по сравнению с гидродинамическим осаждением, что соответствует предложенной модели процесса.

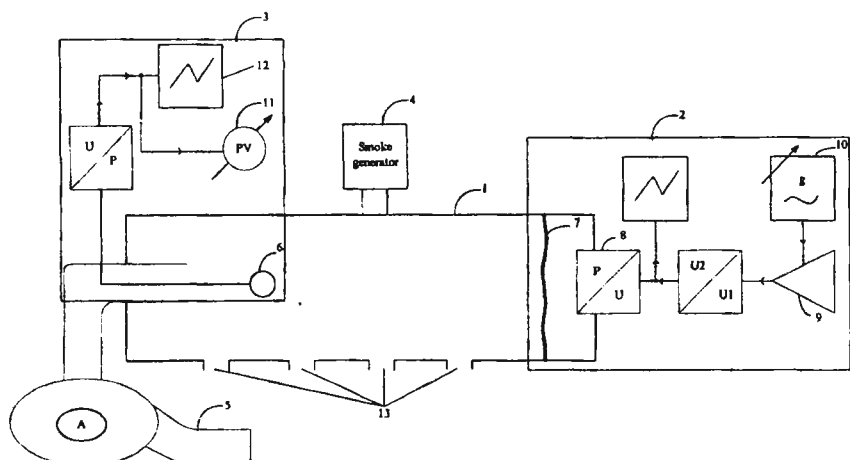
Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных результатов для четырех типов осажденных тонкодисперсных аэрозолей позволяет сделать вывод о правильной математической модели диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничные слои.

Раздел 4 посвящен описанию методики и аппаратуры экспериментальных исследований диффузионного потока и параметров нано- и субмикронных частиц в акустическом поле, в нем также приведены результаты исследований дисперсионного распределения и конфигурации агрегатов нано- и субмикронных осажденных аэрозолей, взаимодействия наноразмерных частиц с поверхностью и рекомендации по выбору параметров технологических установок для осаждения нано- и субмикронных частиц при наложении акустического поля.

Приведено обоснование выбора в качестве аэрозолей для экспериментального исследования наноразмерных частиц табачного дыма 4-х сортов сигарет (по критериям относительной безопасности, простоты генерирования аэрозоля и повторяемости результатов).

В экспериментах измерялся диффузионный поток (число частиц в единицу времени на единицу площади) нано-и субмикронных частиц аэрозолей сигаретного дыма, осевших через акустический и гидродинамический пограничные слои на ситаловые подложки, помещаемые одновременно в акустическую камеру на 4-х различных расстояниях x от источника дыма. Эксперименты со звуком проведены на частоте 930 Гц при уровне звукового давления $p_{140\text{дБ}}$ и на частоте 450 Гц при $p_{90\text{дБ}}$.

Экспериментальная установка для акустического осаждения и сопровождающих измерений представлена на рисунке 5.



1 – акустическая камера; 2 – система возбуждения звуковых колебаний; 3 – аппаратура для измерения параметров звукового поля;
4 – генератор дыма; 5 – система протяжки воздуха; 6 – электромагнитный микрофон; 7 – мембрана; 8 – низкочастотный электродинамический излучатель; 9 – усилитель мощности; 10 – генератор низких частот; 11 – вольтметр; 12 – осциллограф; 13 – отверстия для отбора проб.

Рисунок 5.- Схема экспериментальной установки для исследования акустического осаждения тонкодисперсных аэрозолей

Важным фактором получения новых экспериментальных результатов по акустическому осаждению наноразмерных аэрозолей явилось использование впервые атомно-силовой микроскопии. В основе работы АСМ (атомно-силовой микроскопии) лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

Для иллюстрации, на рис. 6а,б представлены микрофотографии частиц и их агрегатов (кластеров) для табачного дыма сигарет сортов «Malboro» (рис. 6а), «Bond» (рис. 6б). Эксперименты, соответственно, проведены на частоте $f=930$ Гц, при уровне звукового давления $P=146$ дБ, в точке $x_1=0,15$ м при нормальных комнатных условиях. Размеры сканов и масштабы по высоте видны на рисунках.

На микрофотографиях видно, что частицы и их агрегаты имеют традиционную для никотиновой смолы округлую форму. Встречаются сплюснутые агрегаты.

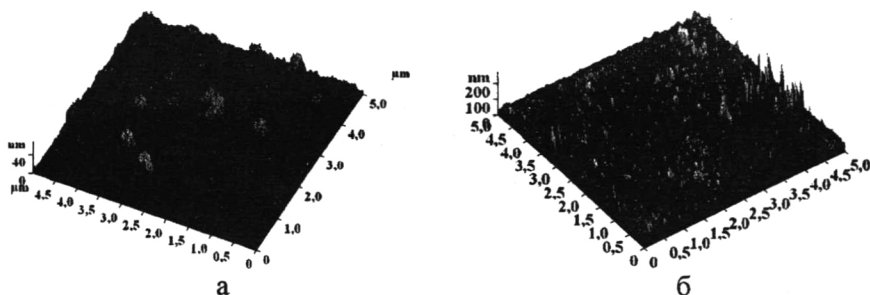


Рисунок 6 - Микрофотография наноразмерных частиц и их агрегатов сигаретного дыма осажденных через акустический пограничный слой $f=930$ Гц: а - «Malboro», б - «Bond»

Для всех подобных сканов для каждой из ситаловых подложек были подсчитаны частицы разных размеров. Эти результаты были обработаны и построены в виде графиков дисперсного распределения в вероятностно-логарифмическом масштабе по координатам. Серия графиков дисперсного распределения аэрозолей табачного дыма для перечисленных сортов сигарет при осаждении со звуком и без звука приведены на рис. 7а,б. Экспериментальные точки отмечены крестиками.

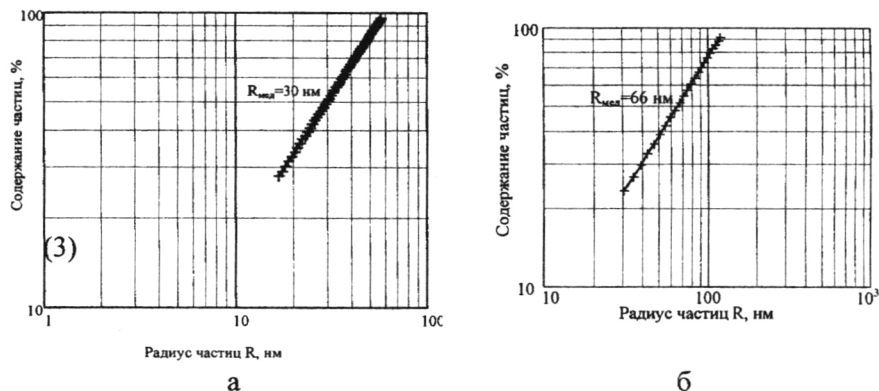


Рисунок 7 - Дисперсное распределение частиц сигаретного дыма осажденных через акустический пограничный слой (частота 930 Гц, уровень звукового давления 146 дБ, $x_1=0,15$ м): а - «Malboro», б - «Bond»

Графики дисперсного распределения в указанных координатах достаточно хорошо укладываются на прямую линию, что говорит о нормально-логарифмическом законе распределения частиц сигаретного дыма по размерам. Полученная закономерность наноразмерных частиц аэрозолей совпадает с подобными зависимостями для промышленных аэрозолей микронного размера, осажденными в звуковом поле.

Для постоянства ряда важных параметров (температуры, атмосферного давления, влажности, плотности среды, условий горения сигареты в генераторе дыма, распределения звукового давления в камере на выбранной частоте, времени осаждения, скорости протяжки воздуха и др.), эксперименты по диффузионному осаждению нано и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничный слой проводили сериями. Последовательность действий в экспериментах была такова. После включения излучателя звука на выбранной частоте проверялся уровень звукового давления. Включалась протяжка воздуха. В генератор дыма включалась зажженная сигарета. На специальных держателях на время осаждения (1 – 1,5 сек.) одновременно вводили на середину камеры через четыре (иногда меньше) отверстия подготовленные (очищенные и пронумерованные) ситаловые подложки. Плоскость всех подложек выдерживалась горизонтально, параллельно оси камеры. Такая же последовательность действий выдерживалась для других сортов сигарет, и при экспериментах по осаждению частиц через гидродинамический пограничный слой (при включенном звуке). После эксперимента все (обычно около 20 шт.) экспонированные ситаловые подложки с соблюдением мер осторожности переносились для сканирования на АСМ в лабораторию НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ.

В параграфе 4.5 приведены расчетные и экспериментальные зависимости сил Ван-дер-Вальса взаимодействия частиц дыма сигарет с ситаловыми подложками. Эксперименты проводились на упомянутом выше АСМ. Из-за высокой подвижности и хорошей адгезионной способности наночастицы прочно осаждаются на ситаловые подложки.

Сканирование с заранее оговоренными размерами сканов осуществлялось с разных участков подложки для усреднения влияния гидродинамического поля обтекания подложки (с краев и в середине пластины). Полученные таким способом нанофотографии частиц с

указанием условий эксперимента представлены в соответствующих параграфах диссертации. Для иллюстраций представлена небольшая часть нанофотографий. Остальная часть хранится на электронных носителях. Результаты обработки представлены в главах 2, 3, 4 и в соответствующих выводах по этим главам. Подсчет числа частиц и измерение их размеров (по горизонтали и вертикали) проводились вручную. После этого осуществлялся пересчет этих параметров осажденных (прилипших) частиц на объем и соответствующий радиус шаровых частиц сигаретного дыма для построения графиков дисперсного распределения. Диффузионный поток осажденных частиц (т.е. число частиц в единицу времени на единице площади) подсчитывался на сканах из общего числа осевших частиц.

В диссертации также приведена оценка погрешностей при измерении параметров аэрозольных наночастиц сигаретного дыма.

Подробные выводы и заключения приведены в конце каждого раздела. Основные выводы по диссертационной работе представлены *в разделе 5.*

Основные результаты работы

1. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования осаждения и взаимодействия нано- и субмикронных аэрозольных частиц в звуковом поле применительно к проблеме выбора параметров оборудования для интенсификации технологических процессов.
2. На основе решения операционным методом уравнения диффузии проведено исследование изменения счётной концентрации от источника аэрозоля до осаждаемой поверхности для нано и субмикронных частиц промышленных аэрозолей, находящихся в акустическом поле. Созданная математическая модель направленной диффузии аэрозольных частиц позволила расчётным путём оценить влияние основных параметров аэрозоля среды и акустического поля на изменение в пространстве осадительной камеры и во времени счётной концентрации осажденных наноразмерных промышленных аэрозолей.
3. Разработана математическая модель и проведено теоретическое исследование изменения диффузионного потока нано- и субмикронных частиц промышленных аэрозолей через гидродинамический и акустический пограничные слои при изменении параметров акустического поля, среды (температуры,

вязкости, давления, коэффициента динамической вязкости) и аэрозоля (размеров, коэффициента диффузии). Показано, что в акустическом поле осаждение тонкодисперсных аэрозолей (особенно наноразмерных) существенно интенсифицируется.

4. Создана лабораторная установка и проведены экспериментальные исследования 4-х типов нано- и субмикронных аэрозолей при направленной диффузии, а также измерение диффузионного потока аэрозолей через акустический и гидродинамический пограничные слои. Получено удовлетворительное совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований.
5. Методом атомно-силовой микроскопии исследованы конфигурация наночастиц и их агрегатов, сила взаимодействия с осаждаемой поверхностью, а так же дисперсное распределения 4-х типов нано- и субмикронных аэрозолей при различных параметрах.
6. Даны рекомендации по выбору параметров технологических установок для осаждения наноразмерных аэрозолей в акустическом поле. Результаты исследований полезны для оценки последствий активного и пассивного курения. По диссертации имеются публикации и доклады на международных и всероссийских конференциях, сессиях Российского акустического общества и конкурсах.

Список работ, опубликованных по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Чернов Н. Н., Тимошенко (Лупандина) М. А. Исследование частиц сигаретного дыма// Таганрог, Известия ТРТУ. - Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2006. - № 12(67). - С.118 – 120.
2. Тимошенко (Лупандина) М.А., Чередниченко Д.И. Исследования влияния частиц сигаретного дыма на дыхательные пути человека/ /Известия ЮФУ. Технические науки. –Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2008. - №5. – С.221 – 224.
3. Тимошенко (Лупандина) М. А., Чернов Н. Н. Дисперсное распределение аэрозольных наночастиц сигаретного дыма при курении// Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2008. - №5. – С.224 – 226.

4. Тимошенко (Лупандина) М. А., Чернов Н. Н. Особенности определения дисперсного состава субмикронных и наночастиц с использованием атомно-силовой микроскопии//Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2009. - №6. – С. 177 – 180.
5. Тимошенко (Лупандина) М. А. Решение задачи о диффузионном изменении счетной концентрации наночастиц методом операционного исчисления//Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2009. -№6. – С. 186 – 193.
6. Тимошенко (Лупандина) М.А., Чернов Н.Н., Голосов П.С. Экспериментальные результаты исследования и сравнение с теорией диффузионного потока нано- и субмикронных частиц через акустический и гидродинамический пограничные слои//Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2011. - №9(122). – С. 174 – 180.
7. Тимошенко (Лупандина) М.А. Диффузионный поток при осаждении наноаэрозолей в звуковом поле// Известия ЮФУ. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2011. - №9(122). – С. 206 – 211.

Статьи в других изданиях

8. Тимошенко (Лупандина) М.А. Силы взаимодействия наночастиц сигаретного дыма с проводящей поверхностью// третья ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: Тезисы докладов (Ростов-на-Дону, 5 – 24 апреля 2007г.,). Ростов на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН – 2007. – С. 195.
9. Тимошенко (Лупандина) М. А. Исследование процессов акустической коагуляции аэрозолей в звуковых полях взрывного типа// Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. Т. I. - М: ГЕОС, 2007. - С. 184-185.
10. Тимошенко (Лупандина) М. А. Взаимодействие наночастиц друг с другом и с поверхностями// Сборник конкурсных работ Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика - 2007», г.Новочеркасск, 19-25 ноября 2007г./ Федеральное агентство по образованию, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: Оникс+, 2007. - С.163-165.

11. Тимошенко (Лупандина) М. А. Исследование взаимодействия высокодисперсных аэрозолей в мощных акустических полях// Неделя науки 2007 (сборник тезисов докладов победителей студенческих научных конференций, проходящих в рамках «Недели науки» за 2007 г.). Ростов-на-Дону: Изд-во «ЦВВР», 2007. - С. 407.
12. Тимошенко (Лупандина) М. А., Чернов Н. Н. Лабораторная установка для исследования поведения частиц сигаретного дыма в мощном звуковом поле// Нелинейные акустические системы. Сборник статей, май, 2008. – Ростов н/Д: ЗАО «Ростиздат», 2008. – С. 202 – 205.
13. Тимошенко (Лупандина) М. А., Чернов Н. Н. Модель осаждения частиц сигаретного дыма на поверхность в звуковом поле с учетом квазистационарности среды// Нелинейные акустические системы. Сборник статей, май, 2008. – Ростов н/Д: ЗАО «Ростиздат», 2008. – С. 206 – 213.
14. Тимошенко (Лупандина) М. А. К вопросу об исследовании параметров аэрозольных частиц// Неделя науки – 2008: Сб. тезисов. Том 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – С. 200-202.
15. Тимошенко (Лупандина) М. А. К вопросу о взаимодействии наноразмерных частиц в звуковом поле.// V Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: Тезисы докладов (8 – 27 апреля 2009 г., г. Ростов-на-Дону). Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – С. 171 – 172.

В работах, опубликованных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты:

- в работе [1] – выполнен эксперимент и подсчет частиц;
- в работе [2] – оценка диффузионного движения дыма в дыхательных путях;
- в работе [3] – подсчет частиц и построение кривых дисперсного распределения;
- в работе [4] – методика построения дисперсного распределения при атомно-силовой микроскопии;
- в работе [6] – соучастие в экспериментах, расчет и анализ диффузионного потока частиц, осевших на подложки;
- в работе [12] – методики экспериментального исследования;

- в работе [13] – расчетная модель осаждения частиц.

Издательство Таганрогского института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44
Типография Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1

Заказ № 52